

研究意义：

电弧故障（Arc Fault）有并联电弧故障和串联电弧故障之分。并联电弧故障表现为电路短路，故障电流大，现有电气保护体系能对其保护；而串联电弧故障因受线路负载限制，其故障电流小，常为 5~30A，甚至更低（荧光灯电弧故障电流有效值约为 0.1A），以至于现有保护体系无法实现对串联电弧故障保护，是现有电气保护体系的漏洞之一，存在潜在电气安全隐患。串联电弧可分为“好弧”和“坏弧”，如电弧焊机、有刷电机工作时产生的电弧及插拔插座时产生的电弧常称为“好弧”；其他非按人类意愿或控制产生的电弧称为“坏弧”。对电弧故障进行检测时，不应将“好弧”误判为电弧故障，进而切断电源造成不必要损失。

实时准确检测串联电弧故障，并切断故障电路是避免电弧持续燃烧以至于酿成火灾等事故的有效途径。依据电弧发生时所产生的声、光、电、磁等特性，采用实验方法研究电弧特性。以电弧电、磁特征作为检测方法输入，实验研究了电弧故障，分析说明串联电弧与并联电弧，交流电弧与直流电弧之不同；在频域展开电弧特性研究，指出故障电弧特征量多集中在 2-200kHz 频段。随着电力电子技术发展，非线性负载增多，传统基于电弧“零休”等特性的检测方法已不能满足要求。采用 AR 参数模型对低压电弧故障进行检测，并给出回路识别参考矢量；采用小波熵分析电弧故障，指出若小波熵值大于 0.002 则可判定发生电弧故障；基于小波变换模极大值建立电弧故障神经网络模型，以实现电弧故障检测与分类。

注：输入参数的提取可以从一下三个方面：（1）负载正常工作时的电流特性；（2）开关插拔产生的正常电弧电流特性现实中我们在拔、插插头的瞬间也会产生电弧，它们持续的时间短，在瞬间就熄灭了，不连续也不影响线路中设备的正常工作，几乎不会因此产生火灾而威胁环境的安全；（3）故障电弧（接触不良）的电流特性。主要是由于线路绝缘层老化、绝缘损坏或者短路等原因而产生的电弧。这种电弧持续时间长，电弧燃烧时放出大量的热量，对周围环境存在极大的火灾安全隐患，是需要预防制止的电弧，也称为故障电弧。

一、采用高频特性的低压电弧故障识别方法 (2016.6)

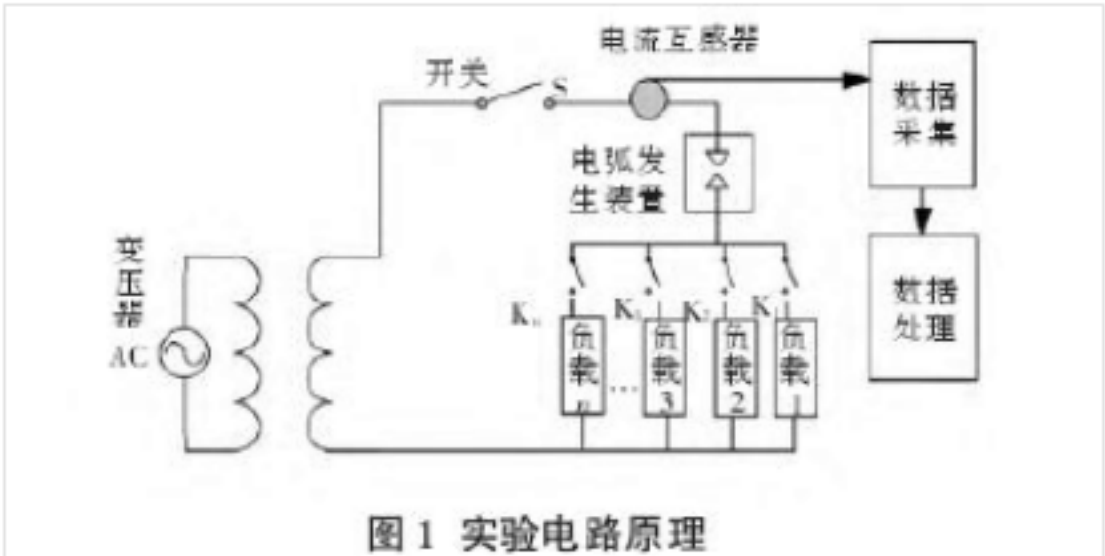
摘要：针对不同类型负载的电弧故障，提出一种基于小波熵的电弧故障普适性检测方法。运用小波变换提取电弧故障发生时在电流过零点附近产生的高频信号，采用该高频信号的小波熵表征电弧故障的突变信息，并利用最小二乘支持向量机对小波熵进行分类，实现对电弧故障的有效识别。

引言：电弧故障是引起电气火灾的重要原因之一，传统的电弧故障检测方法多基于电弧产生的弧光、弧声、温度等物理参数，但是线路中电弧故障位置的不确定性限制了这些方法的应用。电弧电流测量的便利性使其成为电弧故障检测的理想参数。

传统电弧故障的识别方法主要基于电弧电流的谐波占有率分析法，小波提取电弧电流故障特征的时频分析法以及基于自回归模型参数的识别方法等。其局限性在于：因为电弧故障位置不确定，电弧电压无法测得；负载类型繁多且连接方式不同，难于可靠区分电弧故障与正常负载电弧。

本文运用小波分析提取电弧故障发生时电流过零点附近 1.25 MHz ~ 2.5 MHz 的高频信号，以此高频信号的小波能量熵作为识别参数，借助支持向量机对电弧故障信号进行识别，以期获得具有适应于大多数负载及负载混联时电弧故障识别的普适性检测算法。

1、实验平台搭建



主要由以碳，石墨棒和铜棒为电极的可调式电弧故障发生装置、隔离变压器、电流波形传感器、数据采集系统以及计算机。系统采样频率为 5MHz/s。

2.小波熵原理简介

2.1 小波变换

传统的在频域分析方法是傅里叶变换，但其不能反映信号的时域特征，发生电弧故障时信号产生短时高频冲击和微弱的波形突变，经傅里叶变换后，这些时域特征因积分而被踢出，因此傅里叶变换难以提取电弧故障有效信息。小波变换从时域和频域两个方面来反映电弧故障信号时频特征，可以用于辨别电弧故障时电流信号的微小变化。

二、采用小波熵的串联型故障电弧检测方法 (2010.12.30)

摘要：一些电气设备正常工作时的电流特性与故障电弧电流的典型特性相似，当设备或线路发生串联型故障电弧时，使得故障电弧的可靠诊断与检测十分困难。提出一种利用小波熵来反应故障电弧电流信号的能量分布，并由此提取故障电弧电流中瞬变信号的方法，实现对故障电弧电流信号中低能量瞬变信号的有效提取，从而为串联型故障电弧的诊断提供依据。

引言：故障电弧它经常发生在绝缘老化或破损的线路和设备中，或者在导体松弛连接等情况下发生。能够描述故障电弧的物理量有很多，比如温度、弧声、弧光、电弧电压等。用于测量这些物理参数的传感器必须安装在故障电弧发生点附近，本文提出以电弧电流作为故障电弧检测和分析的物理参数，提取能用于快速有效诊断故障电弧的特征量。

注：线性负载与非线性负载区别

二者表现出来的区别就是：“二者都施加正弦电压时，线性负载的电流是正弦的，非线性负载的电流是非正弦的。”

线性负载：故障电弧发生时，电弧电流会产生较明显的“零休现象”，而故障电弧发生前电流却不存在这种“零休现象”。可以采用小波分析算法及快速傅里叶变换实现快速诊断。

非线性负载：施加正弦交流电压时波形将发生严重畸变，出现类似前述的电流“零休现象”，因此很难直接利用这一电流特征来诊断故障电弧。利用多分辨分析小波分析理论。

1.小波熵原理简介

1.1 小波变换

在瞬变信号检测领域中，引入小波熵的概念，用来发现信号中微小的异常变化，能够对时频域上能量分布特性进行定量描述。小波熵值表征了信号复杂度在时频的变化情况。

三、低压系统串联故障电弧在线检测方法 (2016.4)

摘要：本文首先基于居民用电系统搭建了模拟串联故障电弧的实验平台，以常见家用电器为负载的实验方案并采集到不同条件下的故障电弧信号。基于电弧电流的特性分析。

引言：国内外电弧检测的方法大致可以归纳为三类：①建立电弧模型并通过检测相应的参量检测电弧；②根据电弧发生时所产生的弧光、噪声、辐射、温度等变化检测电弧；③根据电弧发生时的电流、电压波形变化检测电弧。

在家庭供配电线路中，开关操作频繁（正常工作电弧）、设备线路状况复杂，容易发生触头松动、绝缘老

化、击穿、接地故障（故障电弧）等问题，增加了故障电弧发生的概率。由于用 电设备分散，利用电弧光、热等物理现象来检测电弧并不现实，适合利用线路 电流的变化来检测电弧。

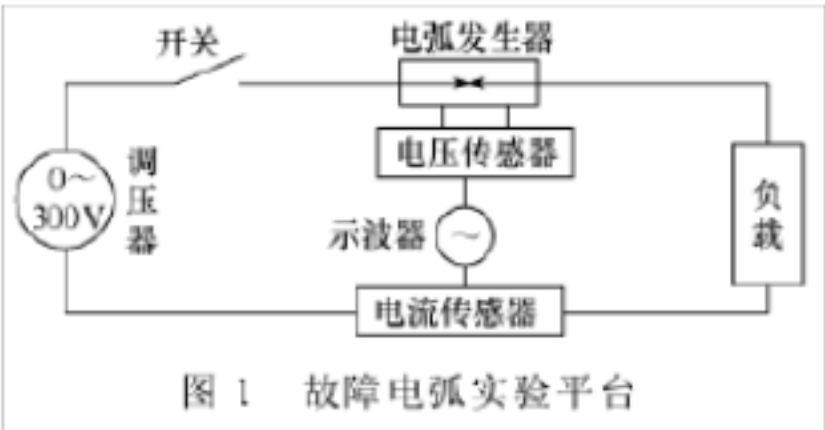
1、利用线路电流检测电弧研究现状

目前的检测方法可以分为三大类：一类基于电弧的某个或 某些特征，如基于电弧 电流畸变点的小波分析法，基于电弧电流高频谐波的傅里叶分析方法，基于电弧电流上升率的分形法，基于电弧随机性的差值-方均根检测方法；二是对电弧进行 整体识别，已有的算法有模型参数法，支持向量机法，神经网络法；三是上述 两种方法的组合， 基于电弧电流波形的畸变性，通过小波变换的细节系数检测电弧电流的畸变点，进而检测出电弧。然而某些 非线性负载正常工作时也存在相似的畸变点，不同负载下的细节系数阈值不统一，需要判断负载的类型；从整体识别的角度，使用神经网络算法对电弧信号进行训练，其 特点是识别率较高，但是实时性差，需要对大量数据进行训练。把小波（包）检测和神经网络识别进行结合，以减少模式识别的数据量，提高了检测的实时性，然而其改善程度并不明显。

对燃弧前后的电流数据进行波形分析，在相邻周期波形相减的基础上，利用小波阈值消噪提取到故障电弧特征量，并应用软件对实验数据进行分析，结果表明该检测方法具有很高的识别率。

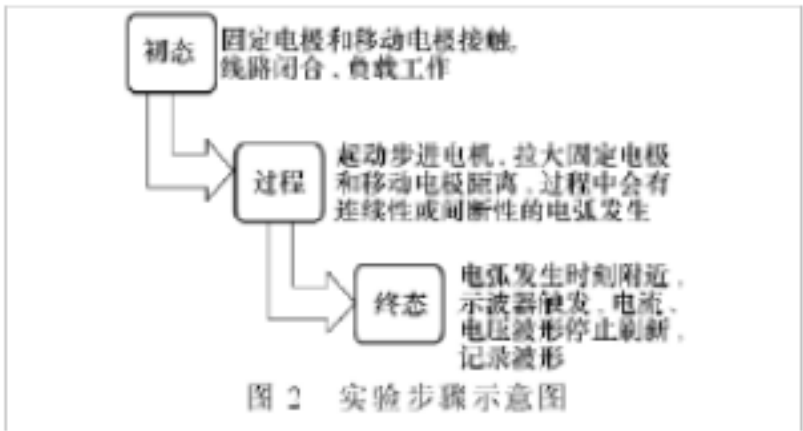
2、实验装置与数据采集

2.1 实验装置



2.2 数据采集

数据采集使用示波器，采样速率选择为 20k Hz，实验步骤如图 2 所示，调节示波器的采样速率和延迟时间，使采集到的波形跨越正常、起弧、燃弧、熄弧全过程。



四、电弧故障断路器的故障电弧电流特性研究（实例） (2012.6)

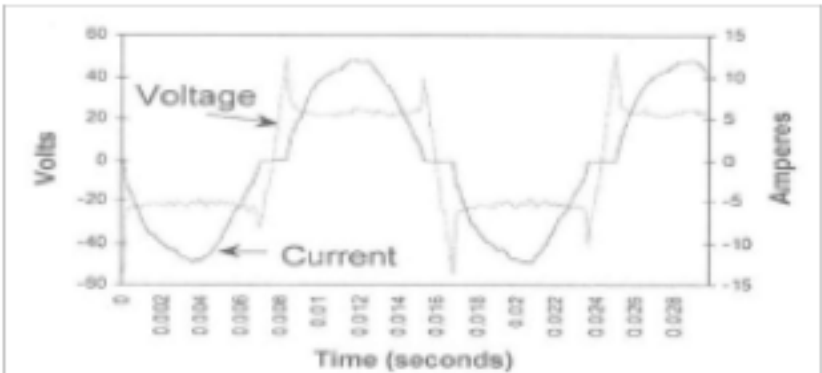
摘要： 电弧故障断路器能够发现故障电弧，其工作的关键在于准确辨识故障电弧。 研究故障电弧电流同正常电流之间的本质差异， 通过不同的数学方法分析电弧和正常情况下电流数据的特征，为识别故障电弧提供依据。

通过搭建的电弧实验平台， 模拟线路中发生串联电弧时的状况， 获得了分别单独以纯电阻、 调光灯、 空调、计算机和调光灯组合作为负载时各自的故障弧电流和正常电流的实测数据（不同负载的故障电弧电流和正常电流）。

对于实测数据， 首先进行数据指标的分析， 分析了负载在故障电弧和正常两种情形下 电流有效值、 平均值、峰峰值、平肩部百分比和电流上升率 等数据指标之间的差异， 找出同一负载两情形下这些指标下的特征。 其次，运用傅里叶变换观察两种情况下的频谱特征， 并比较发生故障电弧时奇次谐波含量和偶次谐波含量与正常情形时存在的差异。 进一步运用小波变换分析实验数据， 根据分解重构后的误差值大小选择合适的小波基函数及分解层数， 依据所选择的小波基函数对数据进行去噪声处理， 信号故障点的判断， 提取小波变换后的能量特征向量，并运用该特征向量作为小波神经网络的输入样本。 傅里叶分析结果和小波变化分析结果的故障电弧神经网络辨识方法。

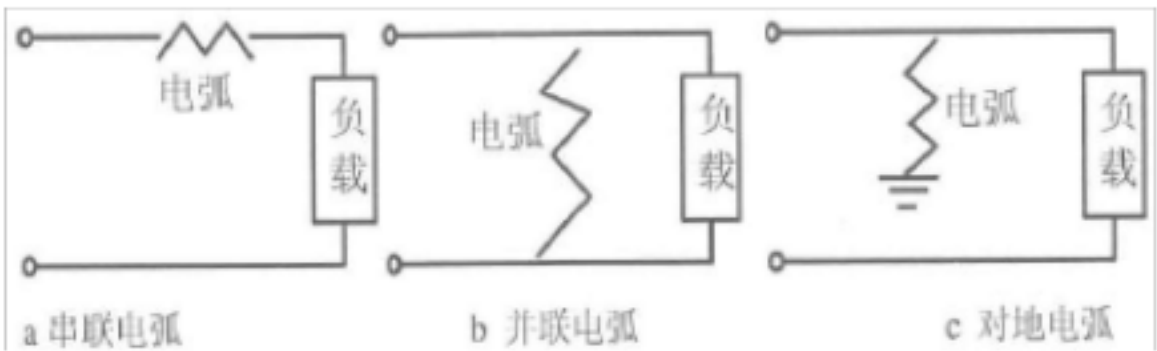
1、对于电弧的一般特性：

- （1）电压和电流中均包含 大量的高频噪声信号 ；
- （2）电压的波形类似于矩形波；
- （3）电弧存在电降，因此对同一电路来讲， 非电弧电流幅值一般大于电弧电流 ，线路存在补偿的情况除外；
- （4）非电弧电流的上升率通常小于电弧电流；
- （5）每过半个周期，电弧电流先于非电弧电流的零点前熄灭，后于非电弧电流的零点后重燃，在这个区域建立一段幅值接近零且变换不明显的区域，被定义为 “平肩部 ”；
- （6）电弧通常也是零星的、短脉冲间穿插着部分正常的电流。对电弧的检测可依据这些特性，研究合适的检测方法。

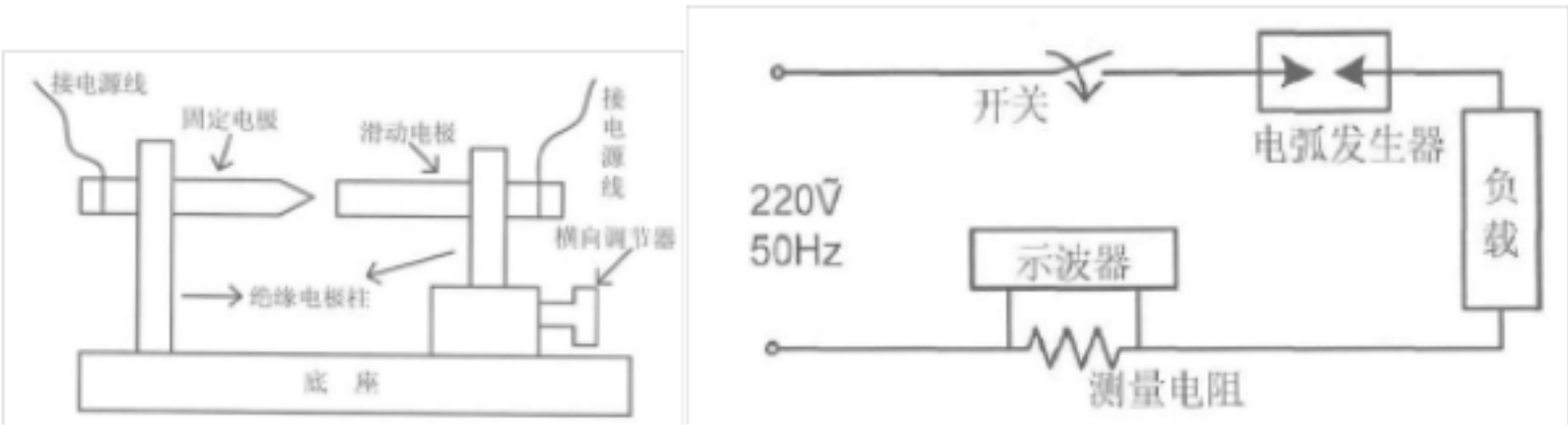


故障电弧电压电流波形

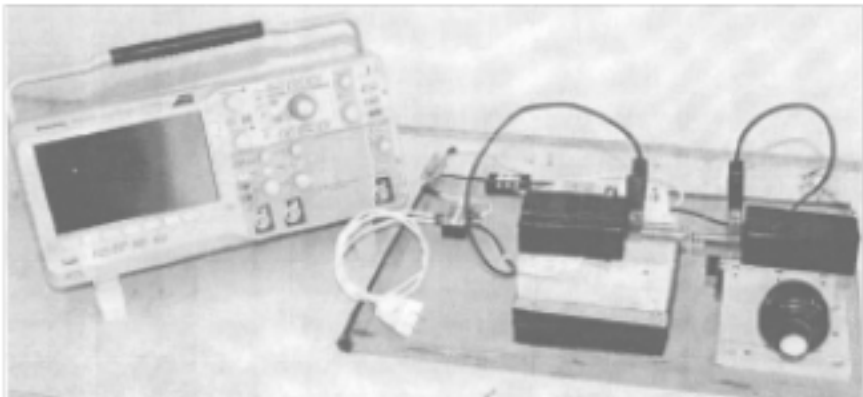
电弧普遍分为 三种形式 ：串联电弧、 并联电弧和对地电弧， 如下图所示。 若将第三种形式产生的电弧归纳到第二类中，此时分为串联弧和并联电弧。



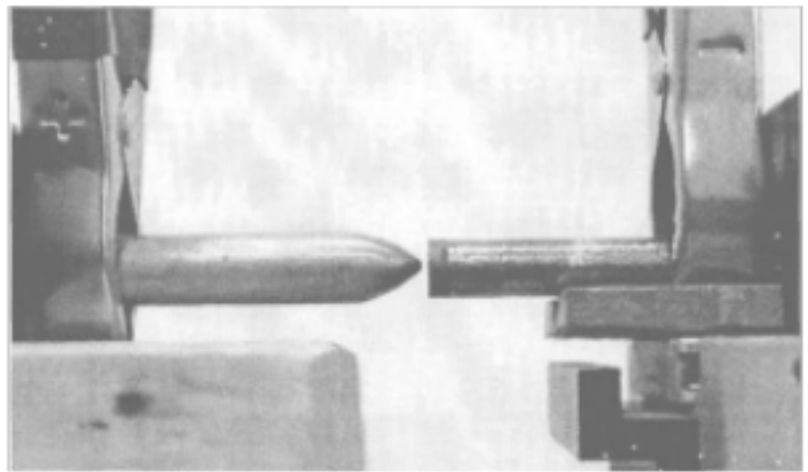
电弧发生器及测量电路图：



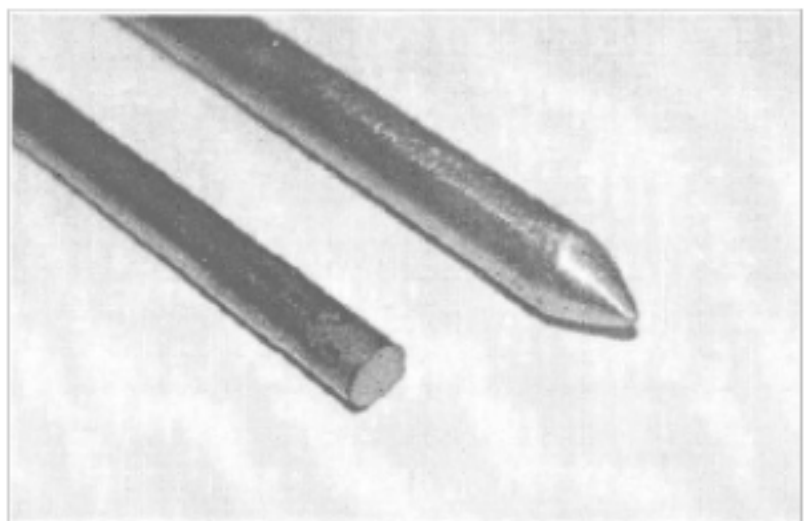
电弧实验实物图：



安装电极部分：



铜棒电极和碳极：



2、实测数据及其处理

比较了两种电流数据的有效值、平均值、峰峰值、平肩部百分比及上升率的差异，即指标分析法。

一般纯电阻负载，正常情形的波形与发生电弧故障时的波形差异明显；但负载位 60W 和 300W 的调光灯时，波形变化不是特别明显。

3、数据的小波变换

傅里叶变换是一种全局的分析，因此无法表述信号的时频局部特性，而时频局部特性恰好又是非平稳信号最基本且关键的性质， 稳定信号理想的处理工具还是傅里叶变换分析 。

傅里叶分析：将信号分解为不同频率的正弦波。

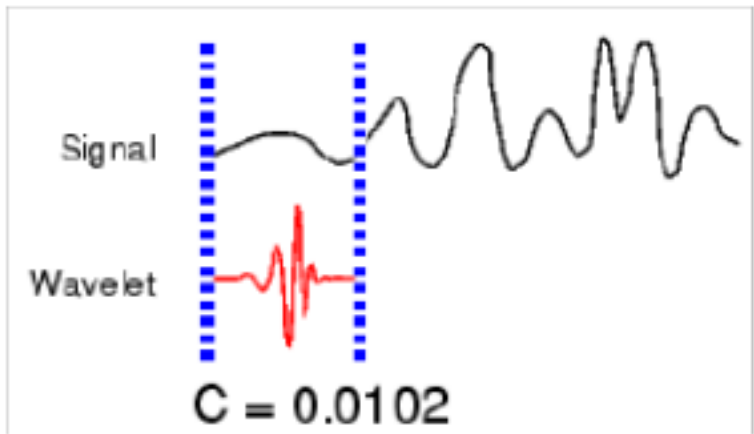
小波分析：将信号分解为不同尺度（比例缩放）、平移（起始位置）的小波。

连续小波变换的 5 个基本步骤：

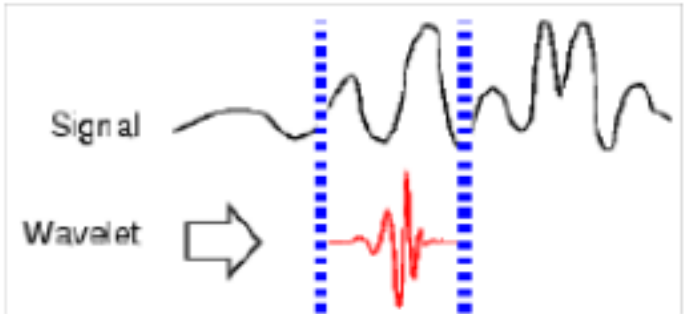
1、选取一个小波，将其与原始信号的 开始一段 进行比较。小波基函数的选取可通过小波分解层数误差比较。

2、计算小波系数 C， 其值的大小取决于小波与选取信号段的相似程度，越相似其值越大。更精确的是若信号与小波能量都等于 1，则 C 可解释为互相关系数。

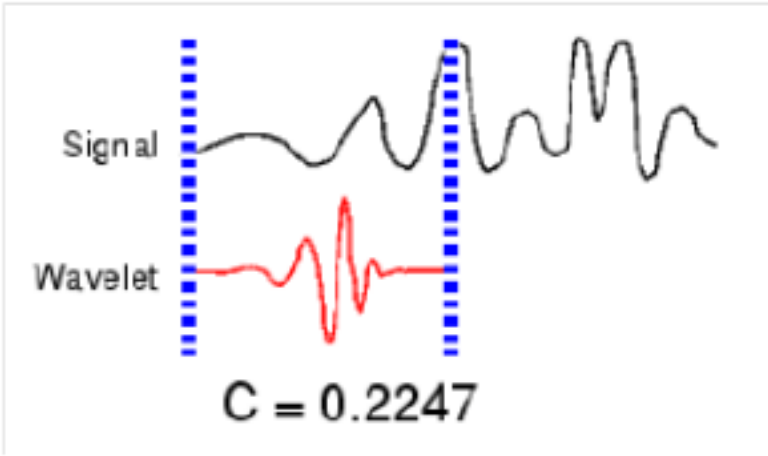
注意：系数的大小与所选择小波的形状有关。



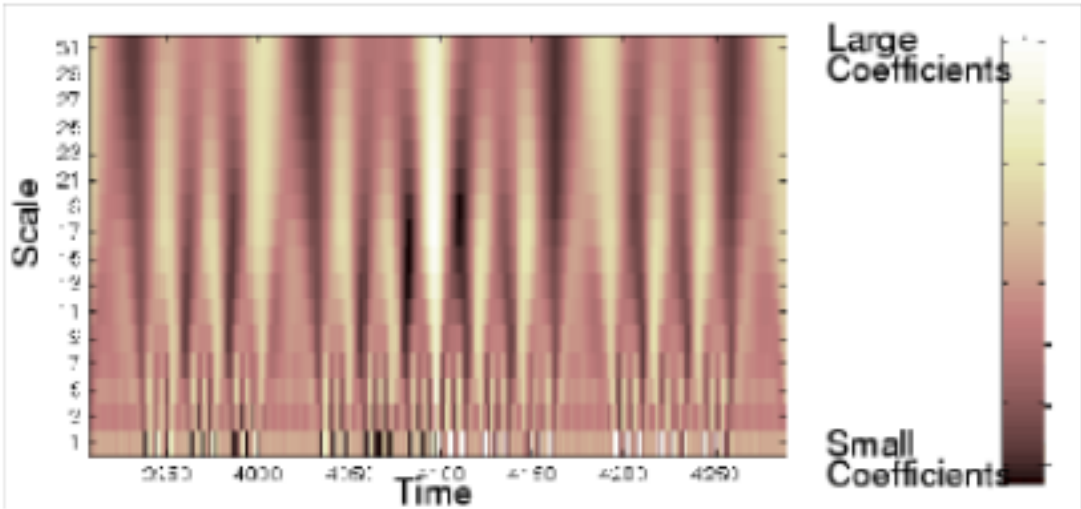
3、从左到右 平移 小波逐段重复步骤 1、2 的比较，直到完成整个信号的比较。



4、小波伸缩（尺度化），重复步骤 1~3。



5、重复 1~4 步得到所有尺度下的小波系数。

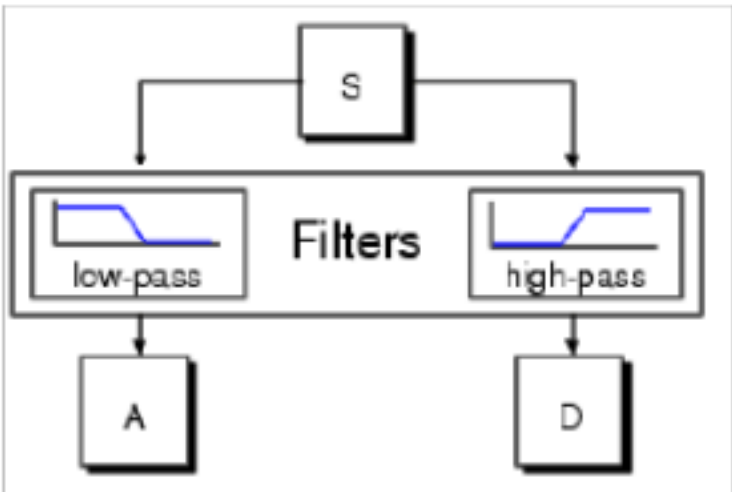


离散小波变换：

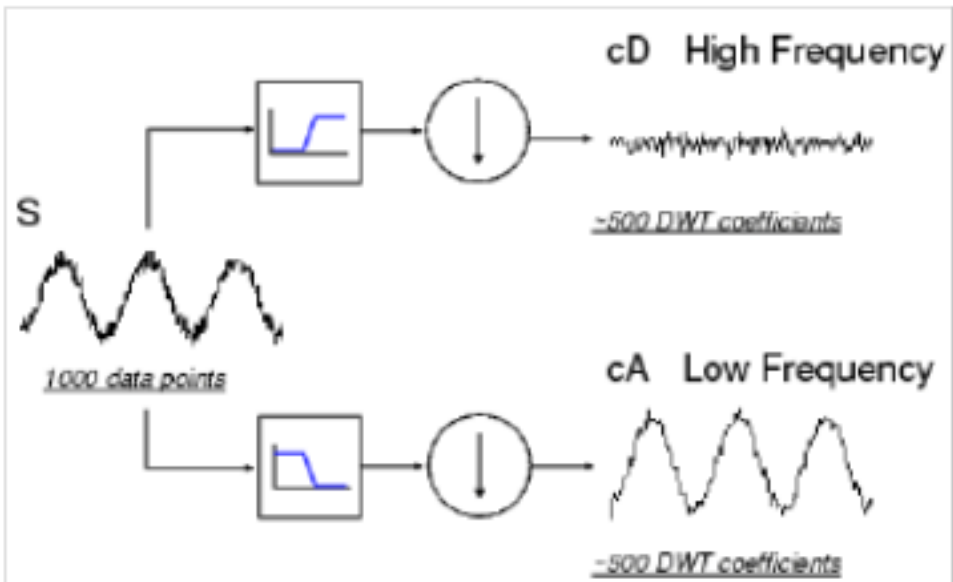
连续小波变换的计算量非常大，费时。

第一部滤波：逼近和细节逼近成分对应大尺度低频分量，细节成分对应小尺度高频分量。

原始信号 S 通过两个互补的滤波器得到两个信号 A 和 D。



使用的原信号为一叠加有高频噪声的实正弦信号，其分解原理图如下，在离散小波分析中采用二取一的降采样技术得到分别具有 500 点的小波系数 cD 和 cA；



Matlab 语句如下

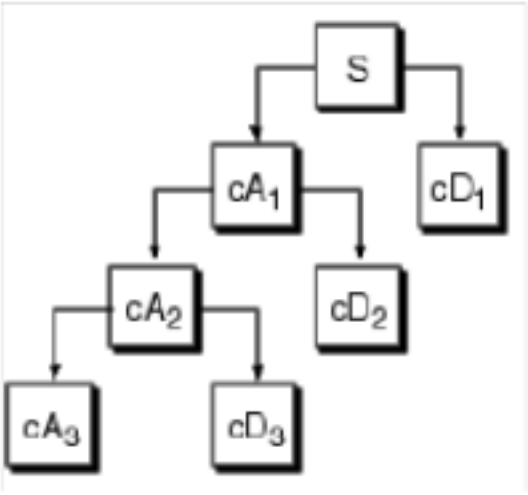
```
s = sin(20.*linspace(0,pi,1000)) + 0.5.*rand(1,1000);
```

```
[cA,cD] = dwt(s,'db2');
```

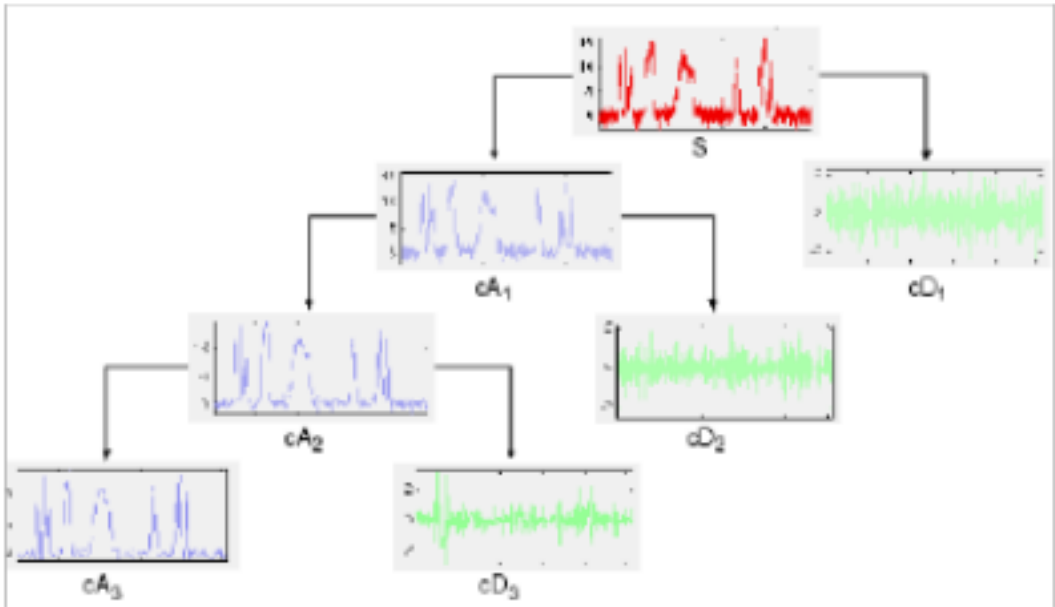
db2 为小波类型。

离散小波多级分解 (Multiple-Level Decomposition)

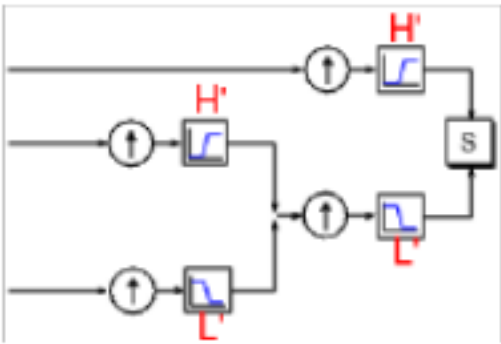
小波分解 树(wavelet decomposition tree)



分解时对逼近系数进行反复分解
信号的小波分解：



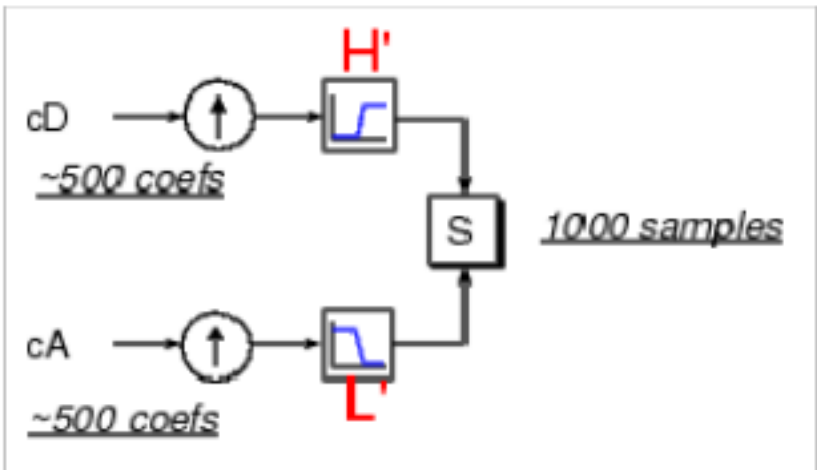
小波重构： 小波分解是小波分析的一半 ,与此相对的另一半是信号的小波重构 (reconstruction), 或综合 (synthesis) (无信息丢失).称为小波逆变换 (IDWT).
下图为信号的小波重构示意图：



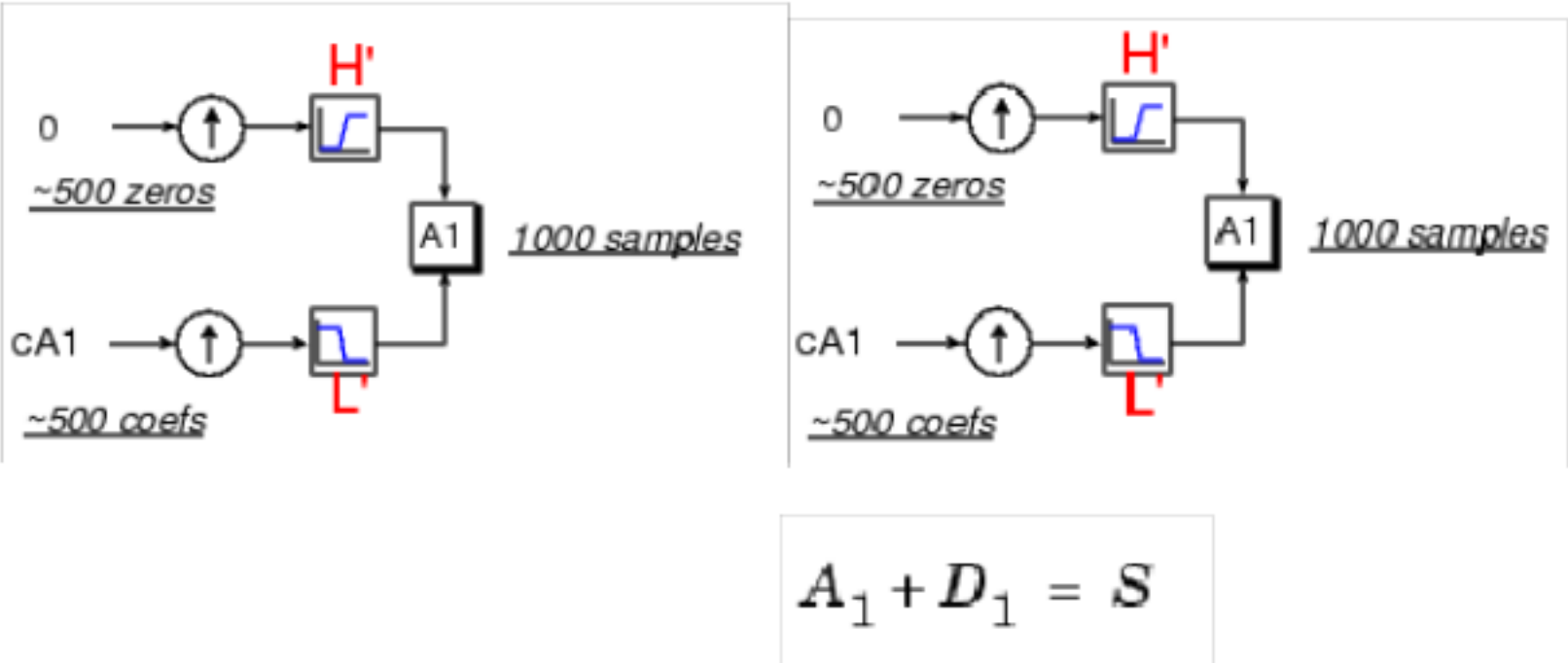
由小波分解得到的小波系数重构信号。
信号的小波重构涉及 滤波 和 上采样
上采样：



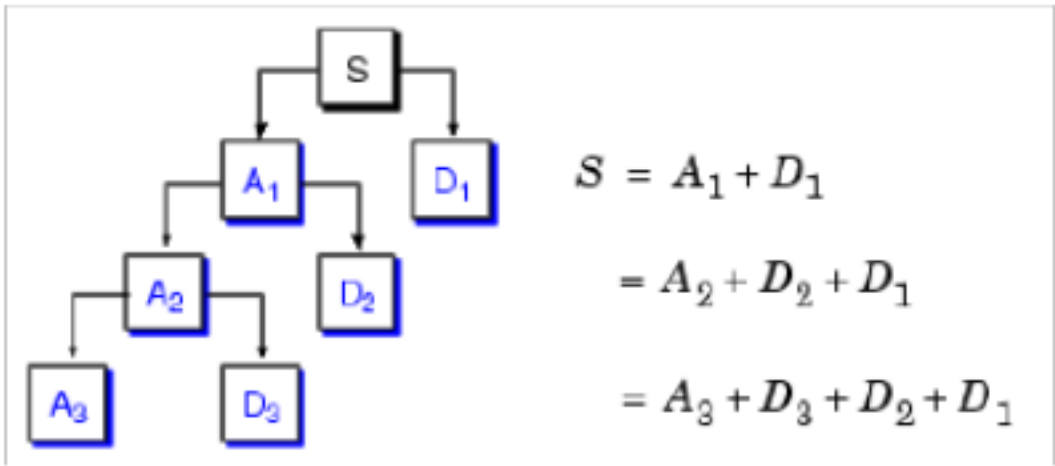
小波重构中的上采样是在 两原数据点间插入零值。
前面所述的是由小波分解系数重构原始信号 ， 与此类似 ， 我们也可由小波分解系数重构某一级的逼近和细节信号 。



单级重构



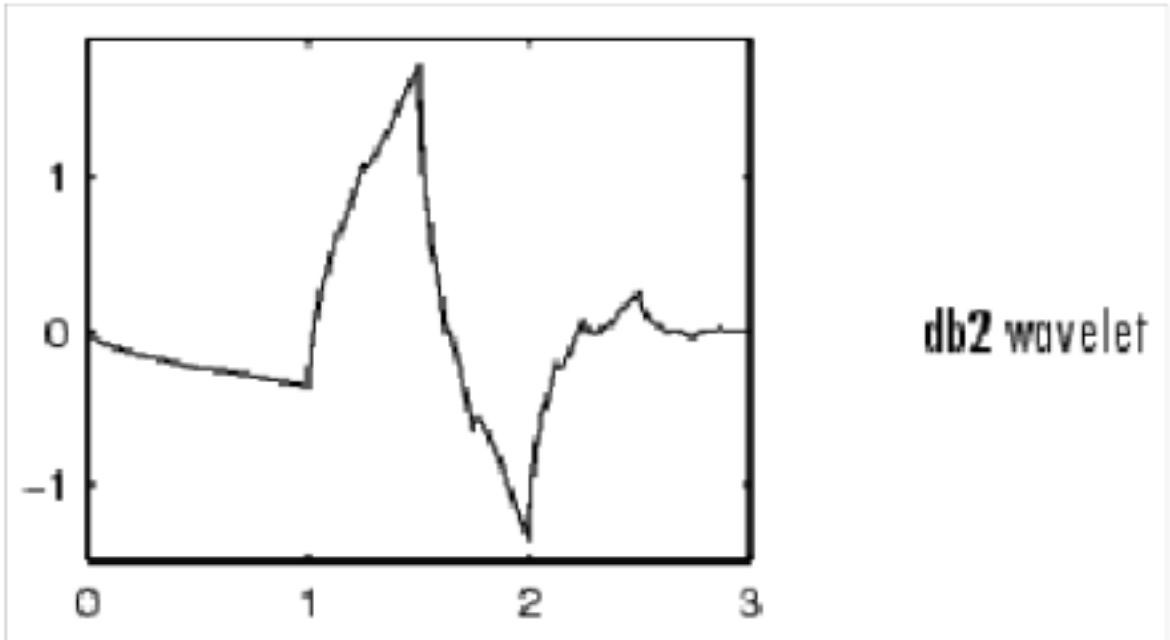
多级重构



滤波器与小波形状的联系：

在实际使用小波中，很少直接从构造一个小波开始，而是设计适合的镜像滤波器，进而选定小波函数计出波形。

构造适合 db2 小波的低通重构滤波器 L：



(1) 低通滤波器系数 可由 Matlab 中的 dbaux 命令得到；


```
Lprime = dbaux(2)

Lprime =
    0.3415    0.5915    0.1585   -0.0915
```

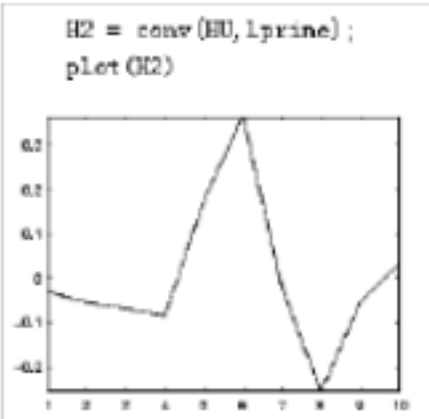
(2) 若反转该滤波器系数向量，并且每一偶数样本乘以 -1, 则可得到 高通重构滤波器 H' 的系数。

```
Hprime =
   -0.0915   -0.1585    0.5915   -0.3415
```

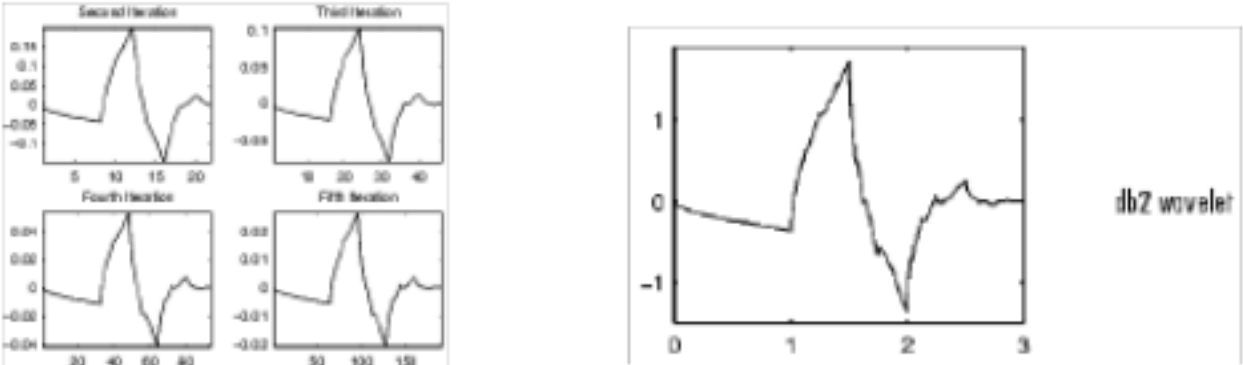
(3) H' 上采样 (H 系数间隔插零)

```
HU =
   -0.0915         0   -0.1585         0    0.5915         0   -0.3415         0
```

(4) 上采样向量与原始低通滤波器卷乘



(5) 若重复该过程几次，即上采样并将结果滤波器向量与原始低通滤波器系数卷乘，则可得到以下图案。

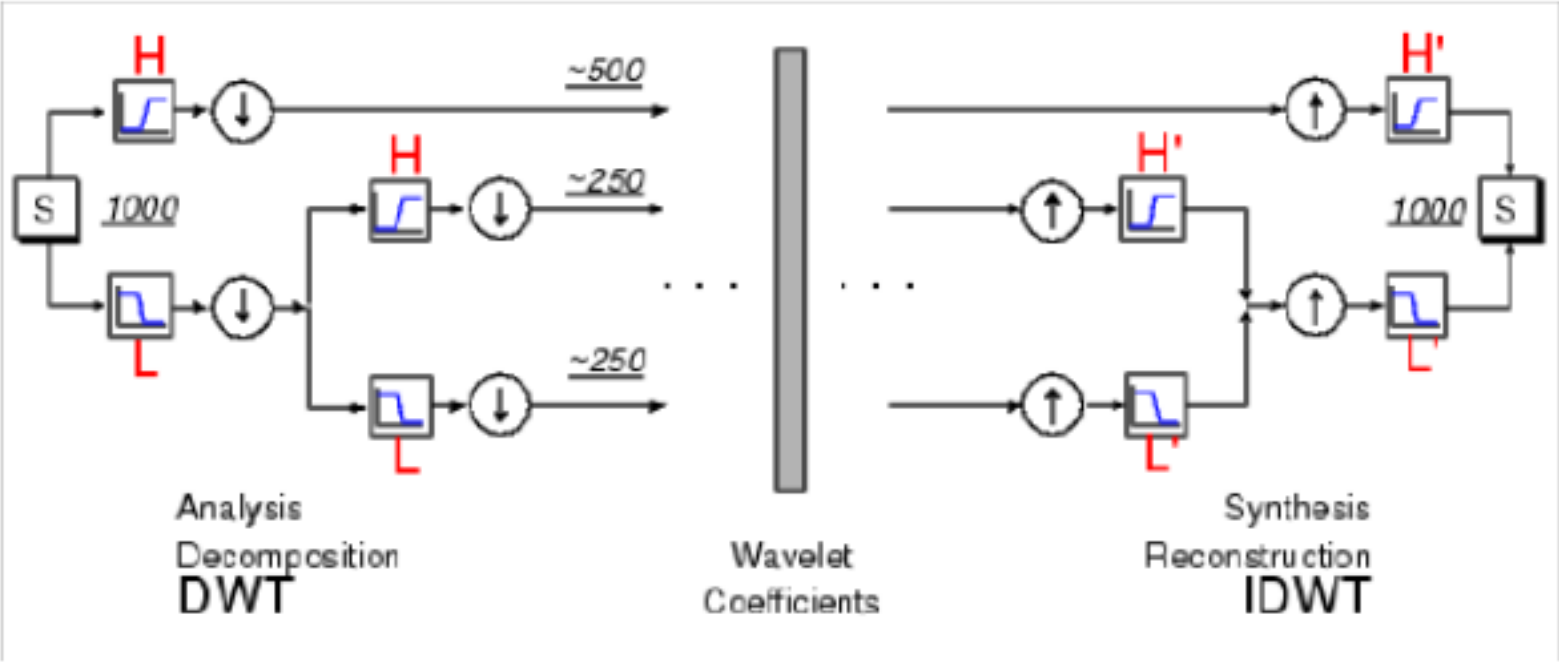


不难看出滤波器形状越来越接近 db2 小波，这表明 小波的形状完全由重构滤波器决定。二者的重要联系说明：

我们不能任意选择一个形状称之为小波并进行小波分析。至少当需要对信号进行精确重构时，我们不能选择任意的小波形状。我们必须选取由 积分镜像分解滤波器所决定的形状作为小波。

通过重复上采样并与高通滤波器进行卷积可得到小波函数（小波的波形——细节信号）；重复上采样并与低通滤波器进行卷积可得到尺度函数的近似形状（逼近信号）。

小波的多级分解和重构可表示为



这一过程包括两个方面：信号分解得到小波系数，由小波系数重构原信号。

4、小波变换后的特征量提取

进一步的分析实验数据的特性，采用了 提取特征量 是比较好的方式，能使分析的结果更具普遍性。

通过对分解后的信号采用单支重构，然后提取每层小波的能量。采用的提取各频段能量的计算公式如下所示：

$$\begin{aligned} Ed_i &= \sum_N cd_i^2 \\ Ea_i &= \sum_N ca_i^2 \end{aligned}$$

其中为分解层数，对于本文中计算机数据能量特征提取，此时取为分解重构后的数据长度，近似信号的能量只需计算分解的最后一层信号的能量，即 Ea_5 而总的能量计算公式为：

$$E_w = Ea_i + \sum Ed_i$$

因此，可得到信号小波变换后的特征向量为：

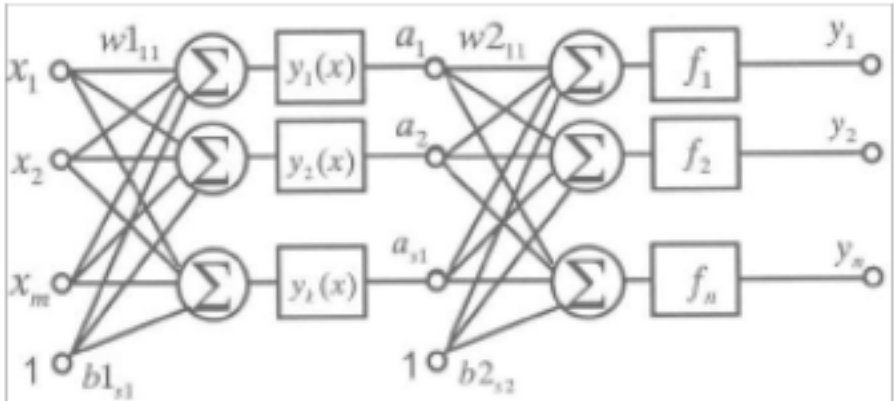
$$\mathbf{p} = [Ea_5/E_w, Ed_5/E_w, Ed_4/E_w, Ed_3/E_w, Ed_2/E_w, Ed_1/E_w]$$

小波变换 最重要 的是在 众多小波基函数中选择合适的小波基函数，文中给出了常见的小波函数，重点介绍了本文使用的小波函数，并比较了函数各个系列在不同分解层数下的误差，以此为参考，选择合适的分解层数对信号进行了层分解。

采用小波分析统计了负载信号分解后的能量，提取能量特征向量，进一步说明数据在小波变换后的特征，同时，为后面的进行神经网络的判别提供训练和测试样本。

5、小波神经网络的基本结构（其模型精度具有争议）

小波神经网络是 小波分析和神经网络相结合 的产物，神经网络与小波函数结合方式为 紧致型 结构，将神经网络隐含层中神经元的 传统激发函数用小波函数来代替。



注意：

- 1、理论上讲任何一个连续的非多项式、常数函数都可以做为 BP 的激活函数，而且这都是已经在数学上证明过的问题。
- 2、但 sigmoid 函数相对其他函数有它自身的优点，比如说光滑性，鲁棒性，以及在求导的时候可以用它自身的某种形式来表示。
- 3、这一点在做数值试验的时候很重要，因为权值的反向传播，要求激活函数的导数。
- 4、多层就有多个导数，如果用一般的连续函数，这对计算机的存储和运算都是一个问题，此外还要考虑整个模型的收敛速度，我上面提到连续函数都可以做激活函数。
- 5、但是相应的 Sigmoidal 型函数的收敛速度还是比较快的（相同的结构前提下）。
- 6、还有就是 BP 在做分类问题的时候， Sigmoidal 函数能比较好的执行这一条件，关于连续函数可以做激活函数的证明，可以在 IEEE trans. on neural networks 和 NeuralNetworks 以及 Neural Computing 和 Neural Computation 上找到。

五、电流型串联电弧故障检测（ 2013.10）

摘要：对低压配电线路电弧故障的特征进行分析研究，采用 Mallat 算法对低压线路电弧故障电流实施变换，获得各尺度小波变换的小波分量，与正常运行分量相比其故障特征明显，且高尺度的小波分量还可以抑制噪声干扰。还对启动电流和电弧故障的小波分量加以比较。

引言：低压配电线路常因接触不良等而出现电弧故障，如果没有及时切断线路，可能导致火灾的发生而电弧故障电流通常在额定范围之内，传统的断路器无法将这类电弧加以准确检测。美国全国电气规程在 2008 年强制规定所有的家用线路都必须安装防火灾的 AFCI（电弧故障断路器），为了提高 AFCI 的可靠性，国内外学者提出了多种电弧故障检测的方法，用短时傅里叶变换分别分析了在阻性负载和计算机负载下，串联电弧电流的基频分量谐波分量变化的特征。采用小波变换对电弧故障电流加以分解结合 BP 神经网络提取故障辨识模式，而 BP 神经网络的实现需要较多的样本数据。采用 SVM(支持向量机)对电弧故障进行识别，该方法对阻感性负载有一定的识别能力。计算了电流上升率，通过判断相邻电流的波动程度以辨别额定工作电流和电弧故障电流。

根据国标 GB /T 7260-3-2003，电路中可以分为线性负载和非线性负载两类。上述这几种检测方法的辨识泛化能力不强，未能提出一种可适用于多类型负载的检测方案。本研究结合多分辨率分析对配电线路的电流信号实施小波变换，提出一种可以提取电弧故障时的特征，解决配电线路电弧故障与非线性负载正常运行的有效区分，同时防止了负载设备的启动电流引起误判断。

1、电弧故障检测方案与理论分析

1.1 故障检测原理

实验线路采用一个自制的电弧发生器来模拟线路发生电弧的现象。将它和各种负载设备串联接入线路，以研究不同负载下发生故障电弧的特性。电弧发生器由一根可移动电极（铜棒）和一根固定电极（碳棒）组成。

1.2 算法理论分析

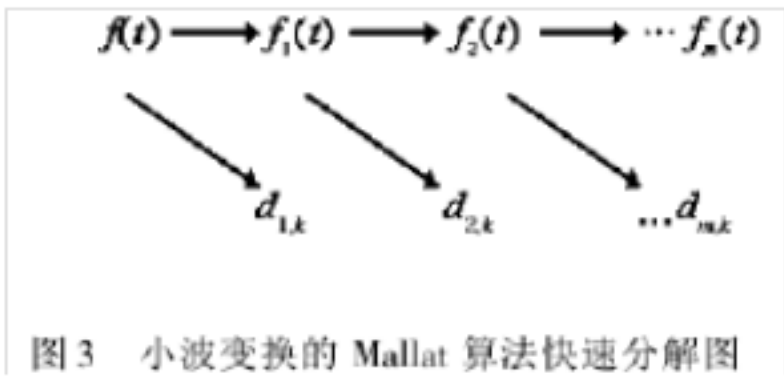
利用 Mallat 算法实现小波变换进行电弧故障识别，即用不同的分辨率逐级逼近信号函数：

$$V_0 = V_1 \oplus W_1; V_1 = V_2 \oplus W_2, \cdots; V_m = V_{m+1} \oplus W_{m+1}$$

其中：V 反映了电弧故障电流信号 f(t) 的近似分量，W 反映了电流信号的细节分量，因电弧故障电流信号其频谱是有限的，如果选择足够大的尺度空间，可将电流信号用各个尺度下标准正交基的组合将其展开，即：

$$f_{m-1}(t) = \sum_n c_{m,n} \phi_{m,n}(t) + \sum_k d_{m,k} \psi_{m,k}(t)$$

将电弧故障电流信号 f(t) 按 Mallat 算法进行逐层二抽取分解，如图 3。d 为不同尺度下分解出来的高频分量即小波变换值，其包含着电弧故障电流噪声和突变信号信息。而且随着尺度的增大，噪声引起的小波变换模的极大值迅速减少，而表征电弧故障的奇异信号的小波变换值便可突显出来。



2、电弧故障特征的提取

常见负载下，配电网线路电弧故障电流一般伴随着几个明显的特征，如电流“零休”现象、电流正负半周不对称、波形失去周期性以及具有丰富的高频谐波等。为了有效地区分负载启动、正常运行与电弧故障状态，选用基于 db4 小波函数的 Mallat 算法快速分析来提取电弧故障特征值。

六、电气火灾故障电弧探测器的研究（2013）

摘要： 建筑物低压配电系统中，现有预防电气火灾的保护装置，主要对过载、短路等引起的过电流及由接地故障产生的剩余电流起到检测作用。当发生易引起电气火灾的串联型故障电弧时，因故障电流值低于传统保护装置的動作閾值，不能全面、有效的预防电气火灾致使我国每年因电气故障引发的火灾，居其他原因引发火灾的首位。

对建筑物低压配电系统中，常引起电气火灾的故障电弧，我国目前还没有颁布明确的标准和规范；现有预防电气火灾的预警装置不能全面有效的检测配电线路上的“串弧”。基于上述原因，本文对建筑物低压配电系统中，易引起电气火灾的故障电弧检测技术进行研究。

1、故障电弧检测的研究现状

为了检测故障电弧，美国学者在年就设计研发出了一种故障电弧断路器（AFCI），该设备可以检测因短路，线路误接，线路老化等引起的故障电弧。加拿大大学的等研究人员在燃弧点附近放置相应的传感器，通过这些传感器来检测故障电弧所产生的电磁辐射、噪声和热量，只有当这三种传感器同时都检测到故障信号时，才能确定系统中产生了电弧故障。

电弧电流的频域特性的发现使得在频域领域进行电弧故障的检测成为了可能。后来电弧检测中引入了傅里叶分解、神经网络、小波分析等算法。

由于故障电弧发生的随机性，对于故障电弧的检测具有一定的难度。由于温度，弧光，气压等传统的电弧传感器无法精准的检测到故障电弧的发生位置。另一方面一些电弧是非常微弱和短暂的，比如通常所说的“好弧”它无法导致火灾的发生，它不是本文所提出的故障电弧，这样就会加大我们的检测难度。

2、故障电弧的产生

故障电弧电流“零休”：当故障电弧发生时，在电弧电流过零点的前后一段时间里，故障电弧气隙之间的阻抗会变得很大，这是限制故障电弧电流值的一个重要因素。在电弧电流的上个周期结束与下半个周期开始的这个时间里，电弧电流并不是一般的正弦波，而是另外的一个规律，那就是电弧电流等于电弧两端电压与电弧阻抗的比值。在这段过零点的一小段时间内，由于阻抗变大，故障电弧电

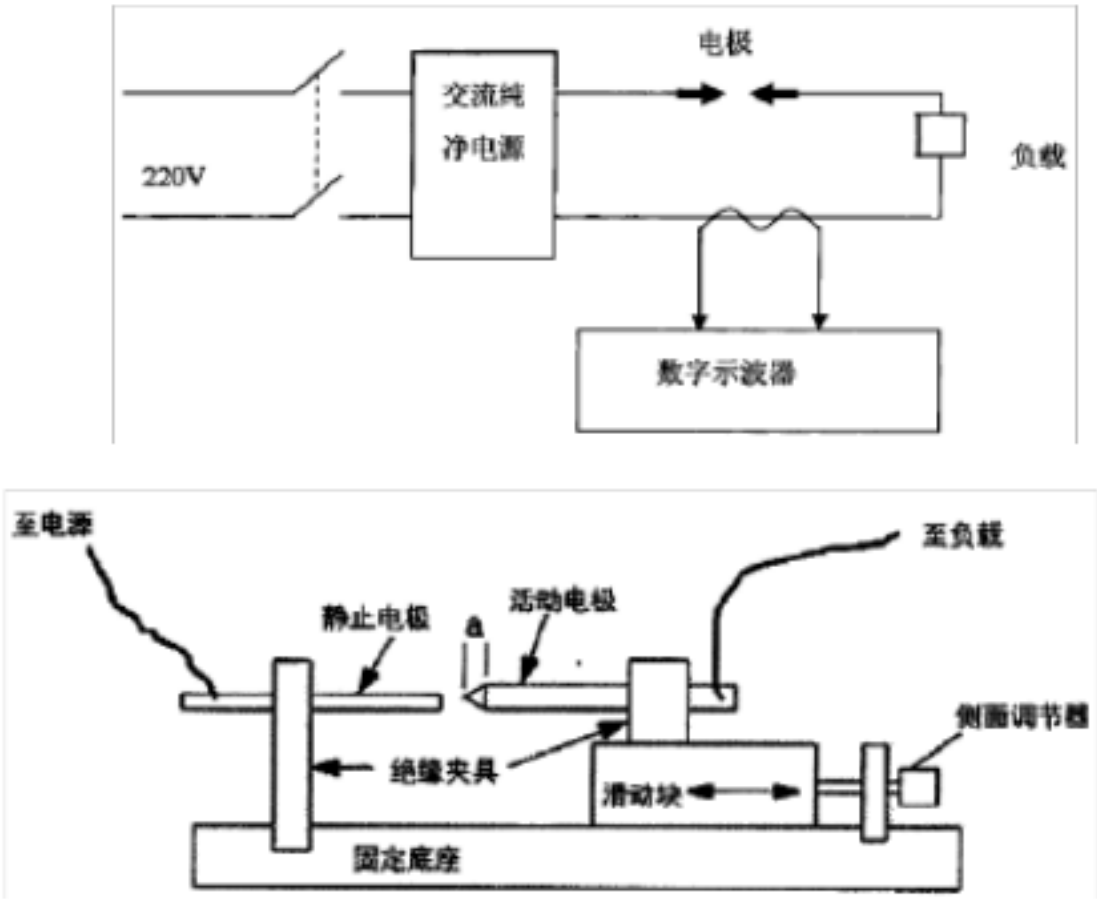
流就会限制的非常小，几乎为零。下一个半周期同样也会出现相同的现象，在这段时间里我们把这种电流近乎为零的现象称之为电弧电流的“零休现象”。

电弧的零休时间跟许多因素有着很大的关联，一方面，它与气隙内部相关，另一个方面，它与电路的电压，电流以及负载的类型相关。一般情况，电弧的“零休”时间会从几微秒到几十微妙。故障电弧的“零休”现象为故障电弧的研究提供一定的理论基础，也为故障电弧检测技术指出了研究方向。

3、故障电弧实验装置的构建

本实验装置的主要构造分为以下几块：220V（50HZ）纯净交流电源，电弧发生装置，数字示波器，电流传感器。

它包括一个静止的直径为6.4mm 碳石墨电极与一个可以移动的铜质电极，静止电极接220V 交流电，移动电极可以接至负载。首先可以将两个电极处于一个完全接触的状态，即是一个线路完全闭合状态，这样可以观察到接负载后供电线路的正常情况的电流特性，然后旋转右边的调节器，可以将活动电极慢慢移动使得它与静止电极慢慢分离，当它们的间隙到达的了一定的距离以后电弧就会发生了，电弧发生以后立即停止移动电极确保电弧持续发生。这时候可以观察在接入负载以后供电线路上产生故障电弧时的电流特性。



为了保证采样精度达到实验的要求，该数字示波器的主要参数设定如下表 2.1 所示：

表 2.1 数字示波器参数设置							
电流量测量				电压量测量			
通道	检测精度	采样频率	存储长度	通道	检测精度	采样频率	存储长度
CH1	8V (A)	10KHZ	2000 点	CH2	20V	10Khz	2000 点

电弧电流的波形会发生很明显的畸变。于是必须针对这个现象展开研究，观察在供电线路中故障电弧的电流特性会受到哪些因素的影响。本文在实验中将不同类型的负载接入实验的供电线路，然后观察和分析故障电弧产生时零休现象的变化情况。

在建筑电气中，大量的存在着阻感性的负载，所以本文在本次实验中选用阻性，感性，阻感性三种负载进行研究，实验的主要工作有以下几点：

- (1)在纯阻性负载的情况下，故障电弧电流的基本特性；
- (2)在纯感性负载的情况下，故障电弧电流的基本特性；
- (3)在阻感负载的情况下，故障电弧电流的基本特性；
- (4)对比以上三种负载下故障电弧的差别与相同点。

4、故障电弧电流数据处理与分析

很多专家都提到，对于故障电弧的检测的难点就在于区分一些热拔插或者特殊负载造成的好弧与故障电弧的差别，因为从直观上看它们都会出现一些共同的特征，这就需要利用小波分析对这个零休时间做一个判别。

七、故障电弧检测的关键技术研究及断路器开发（2013.6）

1、故障电弧发展背景

据相关统计，仅大约电流产生的电弧温度即可达到2000℃-3000℃，足以引燃任何可燃物，而且当电压低至20V时，电弧也可稳定存在，难以熄灭。这种故障电弧常成为电气火灾的点火源。

发生故障电弧时，负载电流通常是非常小的，小于目前电力系统特别是广泛安装在低压配电领域的设备的过电流保护设定值，线路发生故障电弧不在保护的范围之中。所以检测故障电弧时，必须把它和设备正常工作电弧如电焊、电机旋转产生的电弧或开关电器、插拔电器时产生的电弧）的信号及其他相似信号区别开来，提供迅速有效保护的同时，防止误动作的发生，做到检测故障电弧的同时，不影响线路正常工作。

2、故障电弧实验平台

2.1 波形储存设备

我们采用 Tektronix 公司的 DPO3000 系列的示波器，该示波器为4条通道、100MHZ 带宽、所有通道上采样率可以达到2.5GS/s、所有通道具有5M的记录长度。示波器能将记录的点以 excel 的格式存储在外围储存设备中（如U盘、移动硬盘），如此我们就可以将采集到的数据利用 Matlab 等软件进行分析。

3、故障电弧实验数据研究分析

利用 Daubechies 4 阶小波变换在软件中对数据进行处理分析。

低频系数只是重绘了原始波形，波形与原始波形一样，电流值没有改变，只能反映故障电弧波形的概貌，并不能反映故障电弧细节特征；高频系数部分，正常电流和产生故障电弧时的电流波形对应的高频系数区别很明显：正常电流高频系数值很小，故障电弧高频系数在每个周期中都有很大的值，其值大小是正常电流高频系数的十到几十倍，我们可以通过这一特性来判断回路是否有故障电弧发生。

然而，在实际应用中，回路连接的负载各式各样，每种负载的内阻各不相同，这将导致回路中的电流大小也不相同，那么对应小波变换获得的高频系数值会因负载的不同而不同，这给研发适用于多场合、多用途的故障电弧断路器带来了新的挑战。

本课题中采取的解决方案是：在某时刻，利用已经计算得到的高频系数除以该时刻回路中的对应的电流值(等效于低频系数)，利用获得的比值大小来判断回路中是否有故障电弧产生。这样做的好处在于无需考虑回路中接了何种负载，只需计算上述的比值就能判断回路中是否有故障电弧产生。

我们可以通过能量的角度来解释高频系数与低频系数比值的物理意义：经小波变换后的低频系数是原信号去除了高频信号后、反应信号概貌的部分；高频系数部分是原信号包含的突变信号、反应信号细节的部分；高频系数与低频系数的比值反应了在某个时刻，单位能量所含的突变信号量，即线路正常工作时，单位能量保护的突变信号很少，比值很小，而线路发生故障电弧时，单位能量中包含了较多的突变信号，比值较大。

八、故障电弧检测技术研究（2016.3）

1、国内外研究现状

针对故障电弧能够造成一系列的灾害，由上海电器科学研究所负责起草，中华人民共和国工业和信息化部于2013年12月31日发布了有关故障电弧检测装置的准则《电弧故障检测装置（AFDD）》。该准则规定：自2014年7月1日开始实施的JB/T11681-2013适用于在所规定的条件下能够实现燃烧的故障电弧电流实现检测。同时该准则还将燃烧的故障电弧电流与火灾危险动作值比较，并适用于当燃烧的故障电弧电流超过动作时断开被保护电路等功能的装置。

另外由公安部沈阳消防科学研究所负责起草并于2014年6月24日发布了有关故障电弧检测装置的国家标准GB14287.4-2014。该国家标准《电气火灾监控系统》的第四部分关于故障电弧探测装置于2015年6月1日开始实施。

表明了故障电弧防护技术的研究及其相应的断路器装置的研发与应用已经引起有关科研院所以及消防部门的高度重视。

目前有关故障电弧检测的方法大致上可以分为两类：一类是利用故障电弧发生时所产生的一些物理现象如弧声、高温、弧光、电磁波等特性来识别故障电弧。

另一类故障电弧的检测方法是利用故障电弧发生时线路中的电流、电压等电气特性异常来检测故障电弧。

2、小波分析理论与模式识别算法

2.1 小波分析与故障电弧检测中的应用

（1）小波滤波和降噪处理。由于所采集的信号难免受到外界噪声的干扰，运用小波分析的方法能有效去除信号中的干扰，提高采集信号的可信度。

（2）信号的奇异性检测。对信号进行小波分解，小波系数的模极大值对应着信号的奇异点，利用这一性质可以检测信号的奇异性。

（3）信号熵的提取。对采集信号进行小波包子空间分解，提取各个频带的能量熵。根据被测信号在不同的小波分解层次上表现为奇异点位置为对应整齐的性质。此外它还能实现在强噪声污染情况下微弱信号的提取，并反映信号的能量分布情况。

3、故障电弧实验与分析

3.1 改进BP神经网络的设计（将小波变换的模极值作为输入）

BP 神经网络在网络训练的方面还存在几点不足，特别是一些处理时间要求比较短的场所还需要做出改进。

BP 神经网络的缺点主要表现在：某些特殊问题训练时间有可能过长，若在训练过程中权值改变的幅度过大会导致激活函数趋于饱和，进而无法调节神经网络的权值。使用 BP 神经网络算法时，神经网络的权值收敛到的最终值并不一定是所期望的最优解，而有可能是局部极小值。另外还有遗忘旧样本。

九、故障电弧模式识别算法的研究（ 2011）

摘要：采集典型家用电器 正常工作、开关断开、开关闭合、产生故障电弧时的电流波形和数据 ,利用小波分析理论提取能够描述串联型故障电弧特性的特征量作为神经网络的输入量 ,再用神经网络训练和检验建立的网络模型 ,进而实现故障电弧的模式识别。

1、小波函数的选择（难点）

目前有几十种小波函数 ,而且人们还在不断构造新的小波函数和相应的小波滤波器来满足不同小波分析应用的需要。各种小波函数性质各异 ,有的适合理论推导 ,如小波、高斯函数小波类有的更适合计算有的时域上有一较长的支撑有的可以得到完全重构有的则不能实现原信号的恢复。

然而 ,由于小波函数针对不同的工程应用表现出的特性具有复杂性 ,小波函数的选择目前也是小波分析理论研究的难题 ,按什么样的原则能够选择最优的小波函数还没有有效的方法。

一般用枚举法来挑选合适的小波（进行比较） ,当然这种选择不一定是最优的。

合理地挑选小波基函数主要应从以下几个方面来考虑：

（1）紧支性；（ 2）消失矩；（ 3）正则性；（ 4）对称性。

2、小波变换的时频域特性分析

小波变换的高频部分有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率 ,而它的低频部分有较低的时间分辨率和较高的频率分辨率。

3、基于小波变换和神经网络的故障电弧模式识别

3.1 特征提取

从实验所得到的电弧电流波形 ,我们可以看到电弧电流在过零点时有一个明显的 “零体 ”区间 ,而且由于负载和电弧燃烧情况不同 ,电弧电流信号波形有一明显的突变。

3.2 提取特征量

本文用离散小波变换来处理数据。小波重构信号能精确地反映原始信号在时频域上的变化情况 ,而小波能量谱能反映各个频段能量在总能量中所占比例 。

3.3 小波函数类型选择

小波函数类型的选择。一般选择与输入波形最匹配的基本小波。提出如下选择方法对于给定输入信号 ,首先使用不同基本小波进行小波分解然后对各尺度上的小波系数进行阈值处理 ,低于阈值的小波系数置零最后选取非零小波系数个数最少的基本小波作为分析用小波。 本文用实验样本在不同的小波基函数和分解层数下分解并重构 ,通过比较它们重构信号和原始信号的偏差 来确定最佳的小波基函数和分解层数。

十、光伏系统直流电弧故障特征及检测方法研究（2016）

思路介绍：串联电弧的能量大，对线路和设备危害极大，且易引发火灾事故；但目前的低压断路器、熔断器等装置仅能对过流、短路等故障进行检测和保护，不能对电弧故障起作用，由于串联电弧故障电流较小，难以被保护装置检测到，所以需设置额外的故障电弧检测装置。

在电弧故障发生时，电弧两端的电流会瞬间下降，而两端的电压会瞬间提高。电弧故障发生时，常伴随有某一特定的高频信号，在正常工作情况下该高频信号并不出现，一旦该信号出现，则表明存在电弧故障。不同负载及连接方式不同通常高频信号也会有很大差异，所以需要建立精度较高的模型。

十一、基于改进小波变换的故障电弧检测方法的研究（2016）

1、故障电弧检测方法

在故障电弧的研究和检测方面，国内外主要有三类研究方法：第一类，建立相应的故障电弧数学模型；第二类，利用故障电弧产生时的物理特性作为检测的依据；第三类，利用故障电弧的电压、电流特性作为检测的依据。

上述方法不足：第一类方法数学模型的建立可以使故障电弧检测更加精密，但是需要建立纯粹的数学模型，很多故障电弧的参数无法准确的获得；第二类方法简单易行，但是这类检测方法有一个弊端：需要将检测的设备安装在故障点的附近，这样才能准确无误的进行检测；第三类方法就是对电力线路中的电流信号进行分析，用快速傅里叶变换、小波分析、小波熵等算法对电流信号进行分析。这类方法通过监测线路中的电流信号，利用不同的检测算法提取故障电弧特征，方法简单、实用，但是缺少故障辨识模型。

十二、基于小波变换的电弧故障检测技术研究（2012.12）

摘要：电弧故障检测是一项线路保护技术，其主要功能是当发生故障电弧时能及时准确地识别出故障电弧并采取一定的措施保护电路，采用这种技术的保护装置叫故障电弧断路器（AFCI）美国发展比较成熟，国内电弧故障检测技术的研究起步晚，AFCI 产品在国内市场几乎一片空白。

国内低压配电环境与国外低压配电环境不同，电弧故障检测方法和检测标准不能生搬硬套。本论文针对电弧故障检测技术展开研究，根据研究故障电弧的特性，提出电弧故障检测技术方法，能对常见负载线路出现故障电弧时有比较准确的识别率，同时对线路正常工作时有较低的误判率。

十三、基于小波分析和神经网络的模拟电路故障诊断（2012.4）

1、小波包分解法

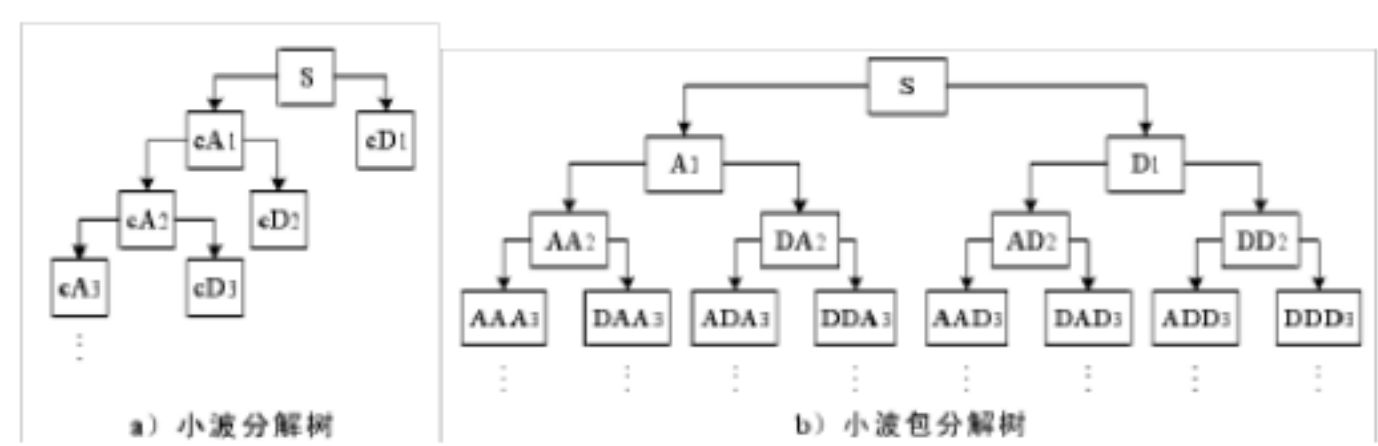
多分辨率分析和 Mallat 算法满足了在某些领域里的信号处理需求，但是其对信号的时频分析仅能在信号的低频段以尺度函数的二进制变换进行分解重构，忽略了高频段，使其不适合应用在有特殊需要的情况。而小波包分解对正交小波变换做了一些改进，是更为精细的一种频带分解与重构方法，能对信号低频和高频同时分解，并且能够给出最合理的小波分解树，自适应地呈现了信号在不同频段应有的合理时频分辨率。

2、多分辨率小波变换与小波包分解的比较

小波分析在高频段的频率分辨率较差，在低频段的时间分辨率较差，为了克服这个缺点，人们在小波分解的基础上提出了小波包分解。小波包分解能够对信号高频率做分解变换，信号的时频分辨率得以提高，符合故障诊断特定情况的信号处理需求。

正交小波分解的过程是原始信号分解成低频和低频成分，然后将低频成分再分解为两部分，分别对应于一个近似系数向量和一个细节系数向量，继续对低频成分分解到具体操作者规定的层数，连续两层的近似系数中缺失的信息由两层中的下层细节系数补充，但是每一层的细节系数向量都不做分解。假使特征频段在高频信号中，则找不到特征信息了。

小波包分解不仅对低频部分做分解变换，而且对每一层的细节系数向量也使用类似于近似系数向量分解的方式再一分为二，高频部分分解的层数与低频部分一样多，便于找到高频成分的有效特征。



3、基于多分辨率分析和小波包的特征量提取

多分辨分析：提取第一层到第 N 层的高频小波分解系数，计算总能量。

小波包：提取 2^N 个低频到高频系数。进行重构再计算总能量。

十四、一种基于小波变换能量与神经网络结合的串联型故障电弧辨识方法

(2014.6)

摘要：针对交流串联型故障电弧发生时回路电流幅值较小、传统线路保护装置不能有效检测的问题，提出一种基于小波变换能量与神经网络结合且适用于多种典型负载的串联型低压交流故障电弧辨识方法。

利用自制的电弧发生装置模拟产生低压交流故障电弧，获取了 6 种典型家用负载情况下 电路正常运行及产生串联型故障电弧时回路的电流信号。对采集的信号进行小波分解，将各层细节信号能量的平均值和标准差输入 BP 神经网络后构成小波神经网络，实现对不同负载测试样本的辨识。采用粒子群优化算法计算神经网络训练初始值，利用自适应学习率方法提高了训练速度。算法输出结果含义明确，输入层特征量选取合理。实验结果表明，采用该方法进行故障电弧辨识的准确率达到 95% 以上。

正常工作电流波形、故障电流波形：线性负载（阻性）、非线性负载（开关电源、容性和感性）。